

ХОМЕНКО АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ДИНАМИКА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
(РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ)

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2003 г.

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты химических производств» Казанского государственного технологического университета.

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| Научный руководитель  | - доктор технических наук,<br>профессор Теляков Эдуард Шархиевич                                  |
| Официальные оппоненты | - доктор технических наук,<br>профессор Комиссаров Юрий Алексеевич                                |
|                       | - доктор технических наук,<br>профессор Зиятдинов Надир Низамович                                 |
| Ведущая организация   | - Всероссийский научно-исследовательский<br>институт углеводородного сырья (ВНИИУС),<br>г. Казань |

Защита диссертации состоится **19 декабря 2003 г. в 14<sup>00</sup> часов** на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого Совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета

Автореферат разослан **19 ноября 2003 г.**

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.0  
д.т.н., профессор



С.И. Поникаров

**Актуальность работы.\*** Типовыми задачами, связанными с математическим моделированием процессов и аппаратов химических технологий в составе химико-технологических систем (ХТС), являются задачи анализа, синтеза и управления. Решение этих задач подчинено единой цели - созданию ХТС с высокими технико-экономическими показателями.

Новым приложением математического моделирования ХТС является разработка компьютерных тренажеров ХТС для обучения и подготовки оперативного персонала химических предприятий. Необходимость использования компьютерных тренажеров продиктована спецификой процессов химических технологий, которая заключается в использовании, как правило, высоких температур и давлений, токсичных, взрывопожароопасных и высококоррозионных веществ. Перечисленные факторы определяют вероятность возникновения нештатных ситуаций, развитие которых до опасных пределов может протекать за короткие промежутки времени. Это предъявляет достаточно высокие требования к квалификации оперативного персонала химических производств. Операторы должны обладать доведенными практически до автоматизма навыками диагностирования возможных отклонений от нормального режима, выявления их причин, прогнозирования возможных последствий, принятия и реализации правильных решений по ликвидации или локализации опасных ситуаций. В этой связи, обучение и тренинг операторов занимают практически столь же важное место, как и технические мероприятия по повышению надежности и безопасности процессов химических технологий.

Использование компьютерных тренажеров регламентировано «Общими правилами взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» Госгортехнадзора России ПБ-09-170-97, в п. 1.16 которых изложены основные требования, предъявляемые к разработке и содержанию компьютерных тренажеров.

На сегодняшний день обеспеченность предприятий компьютерными тренажерами, удовлетворяющими требованиям ПБ-09-170-97, абсолютно недостаточна. Это объясняется большой науко- и трудоемкостью разработки таких программных продуктов.

Теоретической базой создания компьютерных тренажеров являются математические модели динамики ХТС, включающие в себя модели всех основных элементов ХТС. Специфика компьютерных тренажеров заключается в моделировании динамического поведения всех элементов, составляющих ХТС, в едином масштабе времени (реальном или сжатом). Исходя из этого, сформулированы цель и задачи работы.

Настоящая работа выполнена в соответствии с Законом Республики Татарстан «Об энергосбережении» и постановлением Кабинета Министров Республики Татарстан № 468 от 03.07.2000 г. «О республиканской целевой программе энергосбережения в Республике Татарстан на 2000-2005 годы», а также в соответствии с договорами между КГТУ и ОАО «Нижнекамскнефтехим», ОАО «Татнефть», ОАО «Казаньоргсинтез».

**Цель работы.** Математическое моделирование объектов химической технологии, как иерархической совокупности машин и аппаратов, с детерминированным описанием протекающих в них процессов, контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, исполнительных механизмов, представляющей собой слож-

---

\*) В руководстве работой принимал участие к.т.н., докторант Тукманов Д.Г.

ную динамическую химико-технологическую систему, с целью использования в компьютерных тренажерах промышленных ХТС. В соответствии с поставленной целью в работе решаются задачи:

1. Разработка метода расчета динамики ХТС, обеспечивающего адекватное моделирование взаимодействия подсистем различного уровня сложности и иерархичности во времени.
2. Разработка математических моделей динамики элементов, составляющих ХТС, и компоновка модели ХТС в целом.
3. Создание технологии автоматизированной разработки компьютерных тренажеров промышленных ХТС.
4. Разработка всех компонентов компьютерного тренажера (графический интерфейс, учебно-методическое обеспечение, система тестирования и оценки действий оператора и др.).
5. Использование разработанной математической модели динамики ХТС для усовершенствования системы управления промышленного технологического объекта.

### **Научная новизна работы**

1. Разработан новый метод расчета динамики ХТС (метод сквозной синхронизации), обеспечивающий адекватное моделирование взаимодействия подсистем различного уровня сложности и иерархичности в едином масштабе времени.
2. Разработаны оригинальные математические модели динамики ХТС установок газифракционирования, разделения пиролизных газов и выделения окиси этилена.
3. Реализован подход к решению задачи управления точностью моделирования динамики ХТС.
4. Разработана новая методика выбора расположения контрольных тарелок ректификационных колонн, основанная на использовании критерия минимизации энергозатрат при компенсации возмущений.

### **Практическая значимость работы**

1. Создана оригинальная технология автоматизированной разработки компьютерных тренажеров промышленных ХТС.
2. Внедрены компьютерные тренажеры для производств:
  - 1) ОАО «Татнефть», Управление «Татнефтегазпереработка», газифракционирующая установка (ГФУ-300).
  - 2) ОАО «Нижнекамскнефтехим», завод «Этилен-450»:
    - Установка ректификации узла очистки пирогаза (узлы первичного фракционирования и закалки пирогаза).
    - Установка выделения этан-этиленовой фракции (узлы деметанизации, дэтаннизации, выделения этилена).
  - 3) ОАО «Казаньоргсинтез», завод «Оргпродукты», узел выделения товарной окиси этилена.
3. Управлению «Татнефтегазпереработка» ОАО «Татнефть» переданы рекомендации по совершенствованию системы управления узла дэтаннизации ГФУ-300.
4. Компьютерные тренажеры используются в процессе подготовки производственного персонала вышеперечисленных предприятий, а также в учебном процессе на кафедре МАХП КГТУ.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты научной работы докладывались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях, в том числе, на Всероссийской конференции, посвященной памяти А.Г. Усманова,

«Тепло- и массообмен в химической технологии» (г. Казань, 2000 г.), на 16-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-16» (г. Санкт-Петербург, 2003 г.). По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Тренажер ГФУ-300 Управления «Татанефтегазпереработка» ОАО «Татнефть» демонстрировался на расширенном совещании управления Госгортехнадзора России по Приволжскому округу с участием ведущих специалистов предприятий нефтяного и нефтехимического профиля Республики Татарстан, на котором был рекомендован к широкому практическому использованию.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения, содержит 96 страниц машинописного текста, 28 рисунков, 135 наименований использованных литературных источников и 24 страницы приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования.

**В первой главе** рассмотрено состояние теории и практики моделирования динамики тепло-массообменных процессов, протекающих в различных аппаратах и их элементах: тарельчатых и насадочных ректификационных и абсорбционных колоннах, контактных устройствах, емкостях-сепараторах, секциях теплообменников и пр. Рассматриваются методы решения систем уравнений динамики тепло-массообменных процессов, а также методы расчета динамики ХТС в целом.

Проанализированы существующие подходы к исследованию динамических характеристик тепло-массообменных аппаратов, методики выбора контрольных тарелок ректификационных и абсорбционных колонн и расчета настроек ПИД-регуляторов.

Приведен обзор моделирующих программ и компьютерных тренажеров.

В заключение главы сформулированы постановки задач исследования.

**Во второй главе** изложена предлагаемая автором технология разработки компьютерных тренажеров. Раскрывается содержание этапа, связанного с математическим моделированием динамики ХТС. Дается описание разработанного метода расчета динамики ХТС - метода «сквозной синхронизации».

Технология разработки компьютерного тренажера включает в себя ряд этапов:

1. Разработка инструментальной базы, позволяющей автоматизировать процесс создания компьютерных тренажеров.
2. Сбор информации о ХТС: физико-химические и термодинамические свойства индивидуальных компонентов и рабочих смесей, конструктивные и технические характеристики технологического оборудования, параметры технологического режима и данные аналитического контроля, характеристики системы управления.
3. Разработка математической модели динамики ХТС: формализация данных по физико-химическим и термодинамическим свойствам индивидуальных компонентов и рабочих смесей; декомпозиция ХТС на элементы и разработка математического описания протекающих в них процессов; компоновка математической модели ХТС из элементов в соответствии с их иерархией; идентификация математической модели ХТС по данным промышленного обследования.
4. Графическое оформление элементов ХТС: формирование изображений элементов технологического оборудования и панелей приборов; разработка анимации для отображения различных процессов.

5. Мультимедийное оформление тренажера: разработка системы звуковых сигналов; насыщение тренажера видеосюжетами.
6. Создание модели автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора-технолога с имитацией функциональной клавиатуры, пультов управления, а также всех экранных форм и мнемосхем, максимально приближенной к реальному АРМу.
7. Создание электронно-справочной системы: разработка электронного учебника, включающего в себя технологические регламент и инструкции; насыщение интерфейса тренажера всплывающими подсказками.
8. Разработка учебно-методического обеспечения: комплекса учебных упражнений по регламентным, специфическим, нестандартным и аварийным ситуациям.
9. Создание обучающей системы: разработка компьютерных роликов, демонстрирующих корректное выполнение упражнений; разработка речевого сопровождения упражнений; разработка обучающих подсказок и предупреждений.
10. Разработка экспертной системы тестирования и оценки навыков управления.
11. Разработка базы данных по учету пользователей.

Ядром компьютерного тренажера является математическая модель динамики ХТС, которая имеет сложную иерархическую структуру. Ее элементами являются подсистемы различного уровня сложности и иерархичности (машины, аппараты и их отдельные части, устройства, секции и пр., а также компоненты системы управления и др.). В этих элементах могут протекать самые разнообразные процессы. Основой математического описания всего многообразия процессов, протекающих в ХТС, являются фундаментальные уравнения переноса массы, энергии и импульса. Формулируя соответствующие начальные условия и ограничения из этих уравнений можно вывести математическое описание самых различных процессов.

Для рассматриваемых технологических объектов, применительно к которым разрабатывается тренажер, основными элементами являются:

- тепло-массообменные элементы;
- элементы, осуществляющие транспортные функции;
- теплообменные элементы;
- элементы системы контроля и управления, включая исполнительные механизмы.

**Тепло-массообменные процессы** протекают во всех элементах ХТС, в которых присутствует граница раздела фаз. К таким элементам относятся ректификационные и абсорбционные колонны, их контактные устройства или секции этих устройств, секции теплообменников, емкости-сепараторы, делители фаз, насосы, дроссели, трубопроводы и др. В общем случае математическое описание этих элементов включает в себя:

- уравнение общего материального баланса

$$-\frac{d(H^* + H^V)}{dt} = d(L + G); \quad (1)$$

- уравнение покомпонентного материального баланса

$$-\frac{d(H^* \cdot x_i + H^V \cdot y_i)}{dt} = d(L \cdot x_i + G \cdot y_i); \quad (2)$$

- уравнение теплового баланса

$$-\frac{d(H^* \cdot I^* + H^V \cdot I^V)}{dt} = d(L \cdot I^* + G \cdot I^V) + Q; \quad (3)$$

- уравнения для расчета парожидкостного равновесия

$$Y_i = K_{\text{ф.п.и.}} \cdot X_i; \quad K_{\text{ф.п.и.}} = f(T, P, x_i); \quad (4)$$

- уравнения для описания кинетических закономерностей (например, тепло-массообменный к.п.д.)

$$\eta_{т,м} = \frac{\mathbf{G}^* \cdot \mathbf{y}_1^* - \mathbf{G}^* \cdot \mathbf{y}_1^*}{\mathbf{G}^* \cdot \mathbf{y}_1^* - \mathbf{G}^* \cdot \mathbf{y}_1^*} = \frac{\mathbf{L}^* \cdot \mathbf{x}_1^* - \mathbf{L}^* \cdot \mathbf{x}_1^*}{\mathbf{L}^* \cdot \mathbf{x}_1^* - \mathbf{L}^* \cdot \mathbf{x}_1^*}; \quad (5)$$

- уравнения нормировки

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i = 1; \quad \sum_{i=1}^N \mathbf{y}_i = 1; \quad (6)$$

- уравнения для расчета количества фаз, удерживаемых на контактном устройстве

$$\mathbf{H}^*, \mathbf{H}^* = f(\mathbf{T}, \mathbf{Re}^*, \mathbf{Re}^*, \mathbf{Gr}, \dots); \quad (7)$$

- уравнение для расчета гидравлического сопротивления контактного устройства

$$\Delta \mathbf{P} = \Delta \mathbf{P}_{\text{ср.}} + \Delta \mathbf{P}_{\text{оп.}} + \Delta \mathbf{P}_{\sigma}; \quad (8)$$

- термодинамические зависимости

$$\mathbf{C}_p^* = f(\mathbf{T}, \mathbf{x}); \mathbf{C}_p^* = f(\mathbf{T}, \mathbf{y}); \rho^* = f(\mathbf{T}, \mathbf{x}); \rho^* = f(\mathbf{T}, \mathbf{y}); \mathbf{r} = f(\mathbf{T}, \mathbf{x}); \mu^* = f(\mathbf{T}, \mathbf{x}); \mu^* = f(\mathbf{T}, \mathbf{y}); \sigma = f(\mathbf{T}, \mathbf{x}); \mathbf{P}_{\text{н.н}} = f(\mathbf{T}). \quad (9)$$

Данные по физико-химическим и термодинамическим константам и свойства индивидуальных компонентов и их смесей, а также методики их расчета широко известны. В диссертации программно реализована база данных по указанным свойствам и методикам их расчета, которая интегрирована в инструментальную среду разработки компьютерных тренажеров промышленных ХТС.

**Транспортными элементами** являются трубопроводы. Движение вязкой фазы в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса, для замыкания которой используются:

- уравнение неразрывности для потока несжимаемой жидкости

$$\rho \cdot \omega \cdot \mathbf{S} = \text{const}; \quad (10)$$

- уравнение Бернулли для потока вязкой фазы

$$\mathbf{e} = \mathbf{z} + \frac{\mathbf{P}}{\gamma} + \kappa \frac{\mathbf{V}^2}{2 \cdot \mathbf{g}}; \quad (\text{И})$$

- закон сохранения энергии для потока вязкой фазы относительно двух произвольных сечений

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_2 + \Delta \mathbf{h}_n; \quad (12)$$

- уравнения для расчета потери давления и напора на преодоление сопротивления трения и местных сопротивлений в трубопроводах

$$\Delta \mathbf{P}_n = \left( \lambda \frac{1}{\mathbf{d}_s} + \sum \xi \right) \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}; \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{h}_n = \left( \lambda \frac{1}{\mathbf{d}_s} + \sum \xi \right) \frac{\omega^2}{2 \cdot \mathbf{g}}; \quad (14)$$

- уравнения для расчета коэффициентов гидравлического трения и местных сопротивлений

$$\lambda = f\left(\mathbf{Re}, \frac{1}{\mathbf{d}_s}\right); \quad \xi = f\left(\mathbf{Re}, \frac{\Delta}{\mathbf{d}_s}\right); \quad (15)$$

- потери давления на преодоление сопротивления гидростатического столба жидкости

$$\Delta \mathbf{P}_{\sigma} = \rho \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{h}. \quad (16)$$

Если по трубопроводу перекачивается двухфазный поток, то необходимо учесть

и процесс взаимодействия фаз. В этом случае трубопровод является и тепло-массообменным элементом.

**Теплообменными элементами** являются теплообменники и их секции, печи и другие аппараты, в которых теплообмен между фазами происходит через фиксированную поверхность.

Математическое описание теплообменника типа «труба в трубе» описывается системой уравнений, включающей:

- уравнения теплового баланса

$$m_1 \cdot C_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + \alpha_1 \cdot F(T_1 - T_{c1}) + m_1 \cdot C_{p1} \cdot \omega_1 \frac{\partial T_1}{\partial l} = 0; \quad (17)$$

$$m_2 \cdot C_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial \tau} - \alpha_2 \cdot F(T_{c2} - T_2) \pm m_2 \cdot C_{p2} \cdot \omega_2 \frac{\partial T_2}{\partial l} = 0; \quad (18)$$

- уравнение для расчета коэффициента теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + \frac{\sum r_{нар.}}{\lambda_{нар.}} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad (19)$$

- уравнение для расчета теплового потока через теплообменную стенку

$$q_{ст} = \frac{\lambda_{ст}}{\delta} (T_{c1} - T_{c2}). \quad (20)$$

Свои особенности имеет моделирование **элементов системы управления**, которые выделяются в виде отдельной составляющей ХТС. Важным компонентом этой подсистемы является ПИД-регулятор, работа которого описывается уравнением

$$X = k_p \cdot Y + \frac{k_p}{T_n} \int Y \cdot dt + k_p \cdot T_n \frac{dY}{dt}. \quad (21)$$

Кроме того, для полного описания системы управления (СУ) необходимо наличие моделей контрольно-измерительных приборов, датчиков, исполнительных механизмов и других компонентов СУ.

Результаты интегрирования систем уравнений, описывающих процессы, протекающие с различной скоростью (динамикой), при фиксированном шаге интегрирования имеют различную погрешность. В то же время, уменьшение шага интегрирования до величины, обеспечивающей удовлетворительную точность для самого динамического процесса, ведет к нерациональным затратам машинного времени при расчете остальных элементов ХТС. Погрешность расчета элементов ХТС может быть выровнена назначением локального шага интегрирования для каждого элемента ХТС, величина которого может быть определена исходя из следующих соображений.

Как видно из уравнений (1)-(3), динамика тепло-массообменных процессов зависит от соотношения количеств материи или энергии, удерживаемых и поступающих на элемент. Данное соотношение характеризует время удерживания:

- материи

$$\tau^m = \frac{H^1 + H^2}{\sum_{k=1}^n F_{maxk}}; \quad (22)$$

- энергии

$$\tau^e = \frac{H^1 \cdot I^1 + H^2 \cdot I^2}{\sum_{k=1}^n F_{maxk} [1 - E(I^1 + I^2)]}. \quad (23)$$



Выбирается элемент ХТС с минимальным временем удерживания  $\min(\tau_{\min}^n, \tau_{\min}^c)$ , и для этого элемента определяется шаг  $\Delta\tau_{\min}$ , обеспечивающий необходимую точность интегрирования системы уравнений, описывающих этот элемент. Шаги интегрирования остальных элементов ХТС могут быть определены из соотношений

$$\frac{\tau_j^n}{\tau_{\min}^n} = \frac{\Delta\tau_j}{\Delta\tau_{\min}} \quad \text{или} \quad \frac{\tau_j^c}{\tau_{\min}^c} = \frac{\Delta\tau_j}{\Delta\tau_{\min}}, \quad (24)$$

Величина каждого локального шага интегрирования должна быть вписана целое число раз в базовый шаг, который представляет собой хронометрическую единицу. Величина базового шага определяется для элемента с наибольшим временем удерживания по соотношению (24).

Расчет тепло-массообменного элемента ХТС осуществляется в несколько этапов (рис.1).

**Первый этап:** Формирование исходной информации для расчета. Каждый элемент ХТС имеет один или более смежных элементов, из которых в рассматриваемый элемент поступают различные потоки: 1,2...к. Потоки могут быть материальными и энергетическими. Материальные потоки отличаются по составам, расходам, температурам и т.д. Энергетические потоки отличаются по величине. Информация о совокупном количестве удерживаемых и поступивших на элемент фаз является исходной для расчета. Она сохраняется во входном буфере (рис. 1). **Второй этап:** Расчет параметров, характеризующих новое состояние элемента, в соответствии с заложенной математической моделью. Полученная парогазовидная смесь является неравновесной, поэтому новые характеристики этой смеси рассчитываются с учетом кинетики процесса тепло - массообмена.

**Третий этап:** Формирование выходных потоков. Тепло-массообменные элементы ХТС по своему конструктивному исполнению могут быть замкнутыми, как емкости, и открытыми, как контактные устройства. В силу различия геометрического исполнения, данные элементы имеют различные принципы функционирования и механизмы удержания фаз. Поэтому и алгоритм формирования выходных потоков в этих элементах отличается друг от друга.

Рис. 1. Алгоритм расчета элемента ХТС: а) - 1-й этап расчета; б) - 2-й; в) - 3-й.

В элементе, моделирующем работу контактного устройства ректификационной или абсорбционной колонны, из общего количества фаз, получившихся после взаимодействия, сначала выделяются удерживаемые на элементе фазы. Затем, из балансового избытка формируются отходящие на смежные элементы потоки. Если число однофазных потоков, исходящих из элемента, более одного, то балансовый избыток распределяется либо в соответствии с приоритетами и заданными расходами потоков, либо пропорционально текущим пропускным способностям этих потоков. Так, например, на тарелке с боковым отбором жидкой фазы последний имеет приоритет, поэтому отбирается с заданным расходом из балансового избытка, покидающего тарелку, а оставшая жидкость стекает на нижнюю тарелку.

Формирование выходных потоков в элементах, моделирующих закрытые емкости, осуществляется по другому алгоритму. Сначала определяется потенциальное количество фазы, которое может быть принято смежными элементами. Как правило, смежными элементами закрытых емкостей является запорная арматура (вентили, клапаны, задвижки и пр.), которая может быть либо закрыта, либо частично или полностью открыта. Через открытый вентиль может быть передано количество фазы, пропорциональное степени его открытия (или пропускной способности). Если вентиль закрыт, то передача потока не возможна. Поэтому состояние запорной арматуры в данном случае является важным при определении потоков, выходящих из емкости.

Далее, если потенциальное количество фазы, которое способны принять смежные элементы, меньше, чем присутствующее на элементе, то количество удерживаемой фазы определяется как разница между присутствующим и потенциальным количествами. В противном случае вся присутствующая фаза распределяется по потокам, а количество удерживаемой фазы принимается равным нулю. Распределение фазы по потокам осуществляется пропорционально пропускным способностям каждого потока. Если потенциальное количество фазы равно нулю, т.е. все задвижки на выходе из емкости закрыты, то вся присутствующая фаза остается в элементе в качестве удерживаемой, таким образом моделируется наполнение емкости. Если емкость заполнена, то формируется "флаг состояния" емкости «Заполнено» с тем, чтобы «закрыть» потоки, поступающие со смежных элементов.

Особенностью третьего этапа расчета является то, что выходные потоки формируются на основе информации о состоянии смежных элементов. Поэтому важно, чтобы эти состояния к данному моменту были уже рассчитаны, т.е. был выполнен второй этап расчета для всех элементов ХТС.

**Четвертый этап:** Отображение на мнемосхеме нового состояния ХТС. Обеспечивается возможность отслеживать изменение состояния элементов ХТС в реальном времени.

При расчете элемента, моделирующего **запорную арматуру, делители и смесители потоков**, исходной для расчета информацией является его текущее состояние: «Закрыт» или «Открыт на X %». Состояние арматуры может быть изменено в процессе моделирования либо интерактивно пользователем, либо регулятором, связанным с клапаном. На втором этапе рассчитывается текущая пропускная способность, т.е. определяется величина потока, который может быть пропущен через запорную арматуру. На третьем этапе также формируются выходные потоки с учетом состояния смежных элементов.

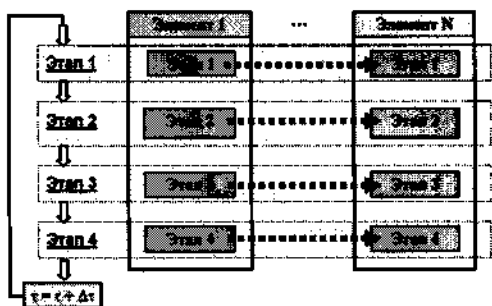


Рис. 2. Алгоритм расчета динамики ХТС методом «сквозной синхронизации».

Элементы системы управления, к которым относятся датчики, регуляторы, исполнительные механизмы, контрольно-измерительные приборы (КИП), преобразователи и др., имеют единый алгоритм функционирования, который полностью вписывается в алгоритм расчета элемента ХТС (рис.1). Каждый из перечисленных элементов принимает определенный сигнал, преобразует его в соответствии с заложенной математикой.

тической моделью и передает смежному элементу.

Поскольку каждое последующее состояние системы формируется на основе предыдущего, возникает необходимость сквозной синхронизации (во всех элементах ХТС) этапов расчета во времени с целью соблюдения хронологической последовательности моделируемых явлений.

Сквозная синхронизация событий подразумевает реализацию одновременно во всех элементах (рис. 2) сначала первого этапа расчета, затем второго, третьего и, наконец, четвертого, при этом последовательность расчета элементов может быть произвольной. Именно поэтому, данному методу расчета динамики ХТС присвоено название «сквозной синхронизации». Необходимость такого подхода обосновывается тем, что объектами ХТС являются подсистемы различного уровня сложности и иерархичности.

**Третья глава** посвящена вопросам идентификации математической модели ХТС.

Взаимодействие подсистем различного уровня сложности и иерархичности характеризуется большим числом факторов. Каждая подсистема включает десятки и сотни элементов, моделирующих различные процессы с индивидуальным набором начальных условий и ограничений. Количество идентифицируемых коэффициентов в каждом элементе ХТС может быть достаточно большим. Кроме того, учитывая погрешность измерения КИП, необходимо предусмотреть возможность получения избыточной информации о параметрах технологических объектов, моделируемых каждым элементом ХТС. Очевидно, что в силу объективной невозможности решения последней задачи на действующем производстве, ставится под сомнение возможность идентификации ХТС в целом.

Однако, решая конкретную задачу, в частности, разрабатывая компьютерный тренажер, необходимо разумно упрощать математическое описание элементов ХТС и использовать эмпирические зависимости. Это позволяет значительно уменьшить размерность математического описания ХТС, и существенно сократить число идентифицируемых коэффициентов.

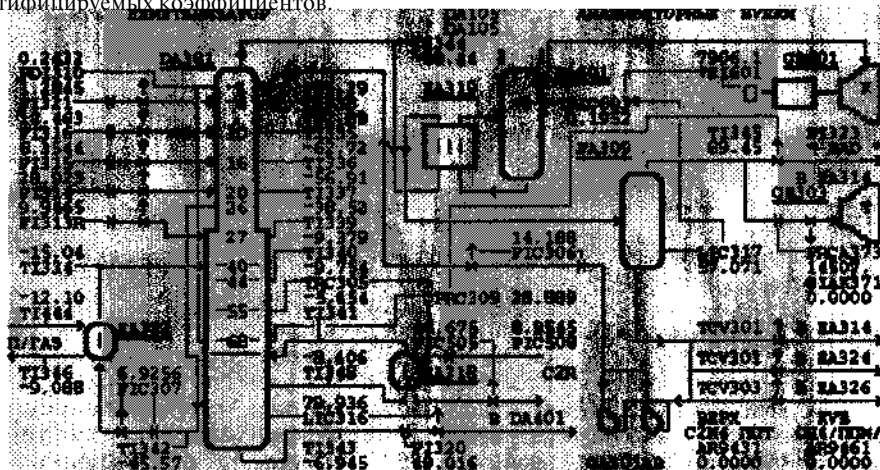
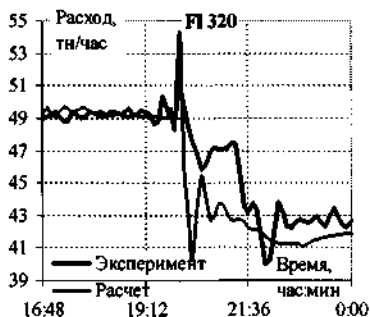
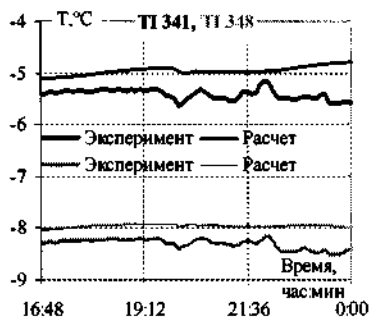


Рис. 3. Технологическая схема и система управления уладеметанизации завода «Этилен-450» ОАО «Нижнекамскнефтехим».

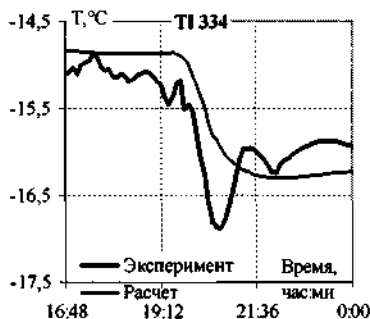
Адекватность разработанной математической модели иллюстрируется на примере узла деметанизации завода «Этилен-450» ОАО «Нижнекамскнефтехим», для которого был разработан и внедрен компьютерный тренажер. Технологическая схема узла деметанизации представлена на рис.3. Деметанизатор представляет собой ректификационную колонну с 68-ю клапанными тарелками. Исходным сырьем является очищенный пирогаз, который пятью фракциями подается в деметанизатор. Основными компонентами сырья являются водород, окись углерода, углекислый газ, метан, этилен, этан, пропилен, пропан, 1,3-бутадиен, бутены, бутаны, пентены и пентаны, бензол. Всего в модели учтено 18 компонентов.



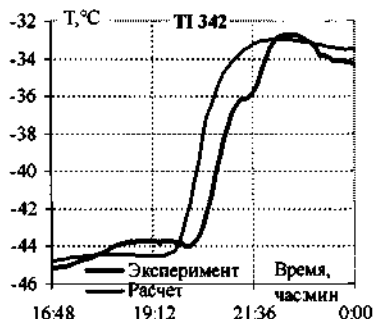
а) Расход кубового продукта.



б) Входная и выходная температуры кубового подогревателя ЕА-318.



в) Выходная температура бокового подогревателя ЕА-322.



г) Входная температура бокового подогревателя ЕА-322.

Рис. 4. Сравнение промышленных и расчетных данных по узлу деметанизации в установившемся и переходном режимах.

Математическая модель была идентифицирована к условиям работы узла деметанизации в стационарном и переходном режимах. Параметрами идентификации являлись тепло-массообменный к.п.д., коэффициенты, учитывающие геометрию контактных устройств, и настройки пятнадцати ПИД-регуляторов. Независимыми входными параметрами модели являлись: характеристики входных потоков питания, рециклового потока через боковой подогреватель ЕА322 и потока флегмы. Выходными зависимыми параметрами модели являлись: расход кубового продукта, температура целевых потоков на входе и выходе из бокового подогревателя ЕА322 и кубового испарителя ЕА318.

Подбор к.п.д. осуществлялся опытным путем для семи секций колонны, состоящих из 9-10 тарелок. Критерием идентификации в стационарном и переходном режимах являлась минимизация относительных отклонений зависимых параметров модели от выходных параметров промышленного объекта при соответствии входных параметров модели и объекта. Базовый шаг численного интегрирования равен 1 сек.

**Таблица 2**

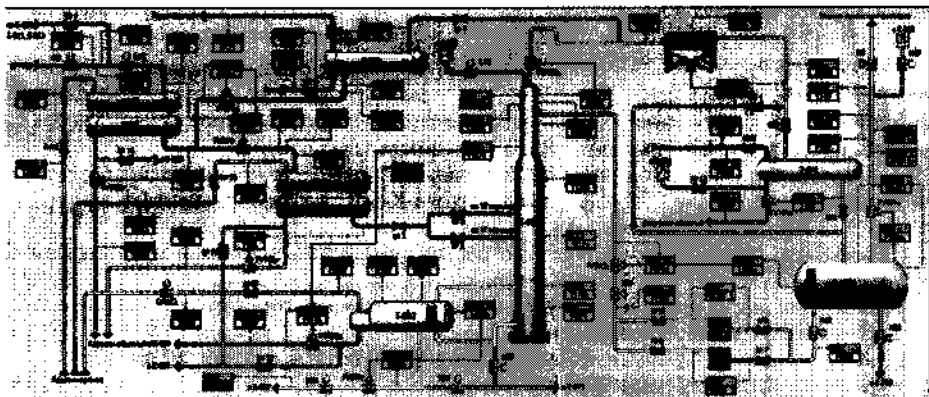
**Сопоставление расчетных и промышленных данных**

Позиция прибора	Относительное отклонение, %	
	среднеарифметическое	максимальное
FI 320	2,94	15,71
T 342	2,93	12,02
T 341	8,35	14,13
T 348	6,49	4,20

нала компьютерный тренажер может оказать не только на действующем промышленном предприятии, но и на реконструируемом или вновь создаваемом.

Управление «Татнефтегазпереработка» ОАО «Татнефть» обратилось с предложением разработать компьютерный тренажер для операторов-технологов газотракционной установки (ГФУ-300), строительство которой происходит в настоящее время, а пуск намечен на декабрь-январь 2003-2004 года. Такой тренажер был разработан и передан предприятию в июле 2002 года. Благодаря этому оперативный персонал получил возможность заранее готовиться к пуску и эксплуатации ГФУ-300 в течение года.

В состав ГФУ входят пять ректификационных колонн: деэтанализатор К-601, депропанализатор К-602, дебутанизатор К-603, колонна разделения бутанов К-604 и получения изопентановой фракции К-605. На рисунке 5 приведена мнемосхема узла деэтанализации ГФУ-300. Исходным сырьем является широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ), в состав которой входят: метан, этан, пропан, и-бутан, н-бутан, и-пентан, н-пентан, гексан, гептан, октан, нонан.



**Рис. 5. Технологическая схема и система управления узла деэтанализации ГФУ-300.**

В силу специфики задачи для настройки математической модели были использованы только проектные данные. Главной задачей на данном этапе разработки тренажера являлась создание такой математической модели, которая при моделировании проектного режима ХТС, во-первых, обеспечивает выполнение требований на каче-

ство разделения смеси, и, во-вторых, показывает качественную адекватность взаимодействия аппаратно-технологической части ХТС с системой управления.

**В четвертой главе** рассматриваются вопросы автоматизации расчета настроек ПИД-регулятора и усовершенствования системы управления узла деэтанализации ГФУ-300.

Для настройки контуров регулирования ХТС необходим надежный алгоритм расчета оптимальных настроек ПИД-регуляторов. Были рассмотрены существующие методики расчета настроек ПИД-регуляторов, из которых были выбраны три наиболее простых: 1) затухающих колебаний; 2) незатухающих колебаний; 3) по кривой разгона. На рис. 6 сопоставлены переходные кривые температуры на контрольной тарелке (№14), полученные при моделировании переходного процесса, вызванного ступенчатым уменьшением температуры питания на 10 °С. Компенсация возмущения осуществлялась основным каскадным контуром с различными настройками корректирующего ПИД-регулятора, полученными по трем перечисленным методикам. Как видно из рис. 6 настройки, рассчитанные по методикам «незатухающих колебаний» и «кривой разгона» настройки, которые обеспечивают практически одинаковое качество регулирования.

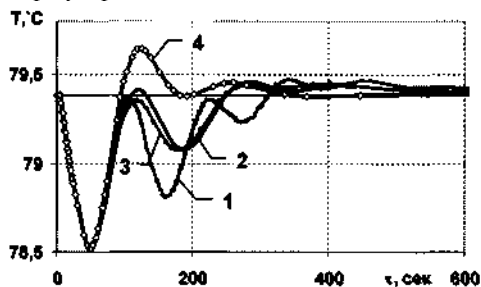


Рис. 6. Переходные кривые температуры на контрольной тарелке, полученные для ПИД-регулятора настройками, рассчитанными по различным методикам.

Параметры настройки ПИД-регулятора К-601 не обеспечивают стабильного поддержания качества продуктовых потоков. Эта проблема может проявиться себя и на действующем объекте.

В этой связи были проведены исследования с целью уточнения расположения оптимальной контрольной тарелки деэтанализатора К-601, а также предложена альтернативная схема регулирования.

Проектная система автоматического регулирования деэтанализатора К-601 включает в себя (рис. 5):

- основной каскадный контур регулирования расхода горячего теплоносителя (керосина) с коррекцией по температуре на контрольной тарелке № 9;
- контур стабилизации давления в колонне и емкости орошения, путем регулирования расхода паровой фазы;
- контур регулирования расхода флегмы с коррекцией по уровню в емкости орошения;
- контур регулирования расхода кубового остатка с коррекцией по уровню в кубе колонны;
- контур стабилизации расхода и температуры питания колонны.

С целью уточнения расположения контрольной тарелки было проведено исследование

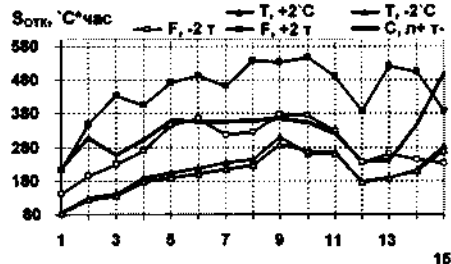
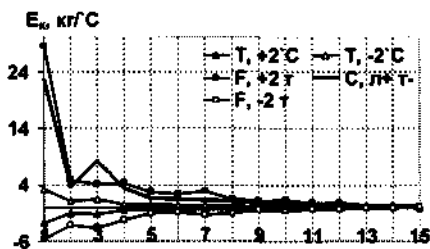
дование чувствительности деэтанизатора к различным внешним возмущениям в трех режимах, обеспечивающих получение кубового продукта с содержанием этана 0,01; 1,0; 1,95 % масс, соответственно. Анализ результатов численных экспериментов показал, что:

- чувствительной к возмущениям является только укрепляющая секция деэтанизатора;
- расположение зон чувствительности в укрепляющей секции в общем случае произвольно, и закономерности их локализации в зависимости от режима работы колонны и от вида возмущения не прослеживаются.

Оптимальная контрольная тарелка определена на основе сопоставления качества компенсации различных возмущений основным контуром регулирования при работе с различными контрольными тарелками. В качестве последних рассматривались все тарелки укрепляющей секции деэтанизатора К-601 и тарелка питания, всего 15 тарелок. Сравнение проводилось по критерию минимизации энергоемкости работы контура (рис. 7,а) при компенсации импульсных возмущений.

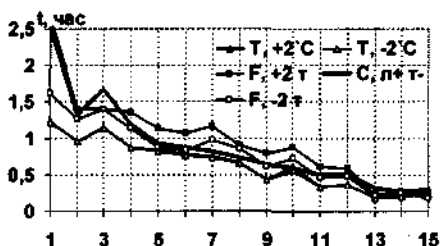
Параметр энергоемкости работы контура представляет собой комплексную характеристику качества регулирования и определяется как:

$$E_k = \frac{\Delta Q \cdot t}{S_{отк}} \quad (25)$$

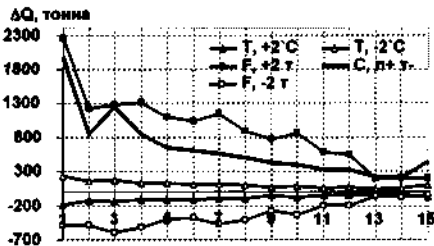


а) Энергоемкость работы контура регулирования.

б) Интеграл отклонения температуры на контрольной тарелке.



в) Продолжительность переходного процесса.



г) Количество горячего теплоносителя, перерасходованного на компенсацию возмущения.

Рис. 7. Сравнительная оценка качества регулирования основного контура с различными контрольными тарелками при импульсном возмущении параметров питания деэтанизатора К-601.

Продолжительность переходного процесса  $t$  определяется, как время, затраченное на минимизацию отклонения текущей температуры на контрольной тарелке от заданной с учетом некоторой погрешности (соответствующей погрешности измерения). Количество горячего теплоносителя  $\Delta Q$ , перерасходованного на компенсацию возмущения, определяется, как разница двух интегралов: первый - интеграл расхода теплоносителя в течение переходного процесса; второй - произведение начального расхода теплоносителя (т.е. до внесения возмущения) на продолжительность переходного процесса. Интеграл отклонения температуры  $S_{откл}$  на контрольной тарелке рассчитывается, как сумма площадей, ограниченных переходной кривой и графиком задания регулятора, с учетом знака.

Кривые на графиках 7 получены при различных возмущениях: (F, +2 т) и (F, -2 т) - увеличение и уменьшение расхода питания на 2 тонны; (T, +2°C) и (T, -2°C) - увеличение и уменьшение температуры питания на 2°C; (C, л+т-) - изменение состава питания: этан+1% масс, пропан+1%, и-бутан-1%, н-бутан-1%.

Как видно из рис. 7,а тарелками, обеспечивающими минимальную энергоемкость работы основного контура при компенсации импульсных возмущений параметров питания, являются тарелки №№13÷15. Из рис.7,в видно, что минимальная продолжительность переходного процесса обеспечивается при использовании тех же контрольных тарелок.

Повышение качества управления технологическими режимами деэтансатора может быть достигнуто также модернизацией проектной схемы регулирования. Альтернативная схема регулирования, представленная на рис.8, предусматривает замену проектного каскадного контура, регулирующего расход горячего теплоносителя с коррекцией по температуре на контрольной тарелке, на контур, состоящий из трех каскадных регуляторов. Первый - регулятор температуры на контрольной тарелке, второй - регулятор соотношения расходов питания и горячего теплоносителя, третий - регулятор расхода горячего теплоносителя. Такой контур позволяет осуществлять оперативную компенсацию колебаний расхода питания изменением расхода горячего теплоносителя одновременно с коррекцией по температуре на контрольной тарелке. Сопоставление результатов моделирования работы проектной и альтернативной схем регулирования приведены на рис. 9.



Рис 8. Альтернативный контур регулирования.

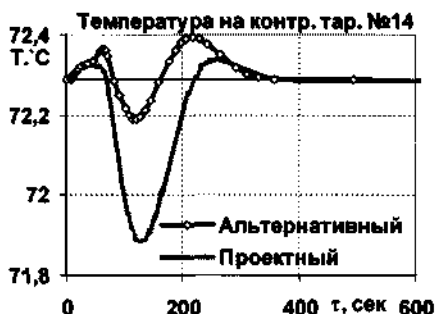


Рис 9. Сопоставление работы контуров регулирования при ступенчатом увеличении расхода питания на 20%.

На основании результатов проведенных исследований разработаны и переданы заводу практические рекомендации по усовершенствованию системы управления ула деэтансизации ГФУ-300.



## Выводы:

1. Для расчета динамики ХТС разработан и использован метод сквозной синхронизации, обеспечивающий адекватное моделирование взаимодействия подсистем различного уровня сложности и иерархичности в едином масштабе времени.
2. Реализован подход к решению задачи управления точностью моделирования динамики ХТС.
3. Предложена методика выбора контрольной тарелки на основе критерия минимизации энергозатрат на компенсацию возмущений.
4. Программно реализованы и интегрированы в инструментальную среду автоматизированной разработки компьютерных тренажеров различные методики расчета оптимальных настроек ПИД-регулятора.
5. Разработаны и внедрены компьютерные тренажеры для производств:
  - ГФУ-300 Управления «Татнефтегазпереработка» ОАО «Татнефть»;
  - блоков разделения пирогаза завода «Этилен-450» ОАО «Нижекамскнефтехим»;
  - блоков выделения окиси этилена завода «Оргпродукты» ОАО «Казаньоргсинтез».
6. Проведены исследования и даны рекомендации по усовершенствованию системы управления узла деэтанзации ГФУ-300 Управления «Татнефтегазпереработка» ОАО «Татнефть».

**Обозначения:**  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>-К);  $C_p$  - изобарическая теплоемкость, Дж/(кг-моль-К);  $d$  - эквивалентный диаметр, м;  $\Delta$  - шероховатость, м;  $\delta$  - толщина стенки, м;  $E$  - доля отгона паровой фазы;  $E_k$  - энергоемкость, кг/°С;  $e$  - полная энергия потока, м;  $F$  - поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;  $F_{mai}$  - максимально возможный расход потока, кг-моль/ч;  $L, G$  - потоки жидкой и паровой фаз, кг-моль/ч;  $Gg$  - критерий Грасгофа;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Gamma$  - геометрический фактор;  $\gamma$  - удельный вес, Н/м<sup>3</sup>;  $N$  - количество удерживаемой на элементе фазы, кг-моль;  $h$  - высота столба жидкости, м;  $\Delta h_n$  - потеря напора, м;  $I$  - энтальпия, Дж/кг-моль;  $l$  - длина трубы или трубопровода, м;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;  $\lambda_{ст}$  - коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м-К);  $K_{ф.р.}$  - константа фазового равновесия;  $K$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>-К);  $\zeta$  - коэффициент передачи (усиления) регулятора;  $\kappa$  - коэффициент Кориолиса;  $\xi$  - коэффициент местного сопротивления;  $\eta_{т.м}$  - тепло-массообменный к.п.д.;  $m$  - количество материи, кг-моль;  $\mu$  - динамическая вязкость, Па-с;  $N$  - число компонентов;  $p$  - число потоков;  $P$  - давление, Па;  $P_{нап}$  - давление насыщенного пара, Па;  $\Delta P$  - гидравлическое сопротивление, Па;  $\Delta P_{сух}$  - сопротивление сухой тарелки или насадки, Па;  $\Delta P_{ор.р.}$  - сопротивление орошаемой тарелки или насадки, Па;  $\Delta P_o$  - сопротивление, обусловленное силами поверхностного натяжения, Па;  $\Delta P_n$  - потери давления в трубопроводе, Па;  $\Delta P_{ст}$  - давление столба жидкости, Па;  $Q$  - количество тепла, Вт;  $\Delta Q$  - количество горячего теплоносителя, перерасходованного на компенсацию возмущения, тонна;  $Re$  - критерий Рейнольдса;  $g$  - скрытая теплота парообразования, Дж/кг-моль;  $\gamma_{т.р.}$  - термическое сопротивление загрязнения, м<sup>2</sup>-К/Вт;  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  - площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $S_{отк}$  - интеграл отклонения температуры на контрольной тарелке, °С-час;  $\sigma$  - сила поверхностного натяжения, Н/м;  $T$  - температура, °С;  $T_n$  - время изодрома, мин;  $T_n$  - время предварения, мин;  $\tau$  - время, сек.;  $\tau^m$  - время удерживания материи, час;  $\tau^e$  - время удерживания энергии, час;  $t$  - продолжительность переходного процесса, час;  $V$  - объем, м<sup>3</sup>;  $w$  - скорость потока, м/с;  $Y, X$  - входной и

выходной параметр регулятора;  $x$ ,  $y$  - концентрации компонентов в жидкой и паровой фазах, мольные доли;  $z$  - пространственная координата, м;

Индексы: **верхние:**  $^x, ^y$  - жидкая и паровая фазы;  $*$  - равновесный параметр;  $^0, ^\infty$  - начальное и конечное значения; **нижние:**  $i$  - номер компонента смеси;  $j$  - номер элемента ХТС;  $k$  - номер потока;  $1, 2$  - параметры, относящиеся к горячему и холодному потокам теплообменника,  $ст$  - параметры, относящиеся к теплообменной стенке.

### Список основных публикаций по диссертации

1. Мулюков К.А., Хоменко А.А., Теляков Э.Ш. Автоматизированный расчет химико-технологических систем. Проблемы и способы их решения. В межвузовском тематическом сборнике научных трудов «Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии», Казань, КГТУ, 2000, с.141-146.
2. Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш., Бикмурзин А.Р., Мулюков К.А., Хоменко А.А. Исследование динамических характеристик ректификационных колонн. В сб. тезисов докладов Всероссийской конференции, посвященной памяти А.Г. Усманова «Тепло- и массообмен в химической технологии», Казань, КГТУ, 2000, с.171-172.
3. Бикмурзин А.Р., Хоменко А.А., Тукманов Д.Г., Теляков Э.Ш. Компьютерное моделирование процессов и аппаратов нефтехимических производств. В сб. тезисов докладов Всероссийской конференции, посвященной памяти А.Г. Усманова «Тепло- и массообмен в химической технологии», Казань, КГТУ, 2000, с. 110-111.
4. Теляков Э.Ш., Бикмурзин А.Р., Хоменко А.А. Моделирование химико-технологических систем совместно с системой управления. МАСИ (IASS) Вестник Академии. Информатика, экология, экономика, Т.5, часть 1, М.: 2001, с. 56-62.
5. Хоменко А.А., Мулюков К.А., Теляков Э.Ш., Бикмурзин А.Р., Тукманов Д.Г. Сквозной расчет динамики химико-технологической системы. В межвузовском тематическом сборнике научных трудов «Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии», Казань, 2002, с.102-107.
6. Хоменко А.А., Мулюков К.А., Теляков Э.Ш., Тукманов Д.Г., Бикмурзин А.Р. Расчет динамики химико-технологических систем. МАСИ (IASS) Вестник Академии. Информатика, экология, экономика, Т.6, часть 1, М.: 2002, с. 60-65.
7. Теляков Э.Ш., Бикмурзин А.Р., Тукманов Д.Г., Хоменко А.А., Мулюков К.А. К вопросу расчета динамики химико-технологической системы. В сб. трудов 16-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-16», Т.3, Санкт-Петербург, 2003, с. 24-28.

**E-mail:** [Telyakoff@mail.ru](mailto:Telyakoff@mail.ru) **http:** [www.simulator-pro.narod.ru](http://www.simulator-pro.narod.ru)

Соискатель



/А.А. Хоменко/